

# Ahorro y eficiencia energética derivados de nuevas tecnologías de siembra

En una próxima publicación del IDAE se trata el tema de si es posible el ahorro energético y de insumos aplicando técnicas de agricultura de precisión. Este artículo contiene un extracto de dicha publicación, en este caso sobre la siembra, y en particular sobre la siembra directa.

Constantino Valero Ubierna<sup>1</sup>,  
Miguel Garrido Izard<sup>1</sup>, Pilar Barreiro Elorza<sup>1</sup>,  
Luís Alcino Conceição<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Madrid  
<sup>2</sup> Escola Superior Agrária de Elvas del Instituto Politécnico de Portalegre

Cuando se habla de siembra usando técnicas de agricultura de precisión, es frecuente pensar en primer lugar en tecnologías de dosificación variable. En tal caso el ahorro de insumos vendrá, lógicamente, por la vía de una reducción en la cantidad de semillas empleada, al ajustar la densidad superficial del cultivo (plantas/ha) a los valores óptimos en cada zona de la parcela, o a otros inputs (agua, fertilizante, etc.). Las consideraciones a realizar en caso de usar dosificación

variable de semilla son muy similares a las indicadas para abono o fitosanitarios. De hecho, los mecanismos de dosificación electrónica son muy similares a los de, por ejemplo, una abonadora neumática. Sin embargo hay otra aplicación de las tecnologías de AP que incide mucho más directamente en el ahorro energético.

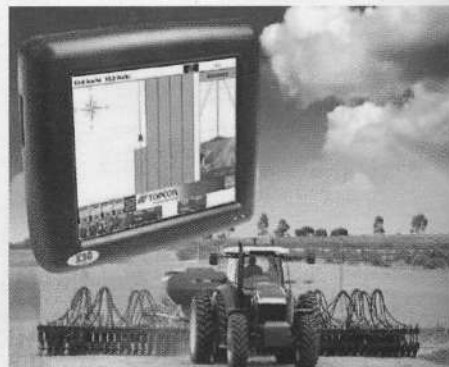
## La siembra directa con agricultura de precisión

La siembra directa es la operación de implantación de cultivo en la que las prácticas de agricultura de precisión pueden mejorar significativamente la eficiencia energética y los resultados de nascencia, comparado con su aplicación a una siembra convencional. En los sistemas de siembra directa (**foto 1**) la variabilidad en la resistencia del terreno y en los residuos del cultivo anterior amplifican las dificultades en el establecimiento de la semilla y la nascencia, con consecuencias a veces dramáticas en la productividad superficial.

La clave radica en emplear sistemas de control pasivo y/o activo de la profundidad que permitan ajustar la fuerza normal de la reja o los discos contra el suelo durante la siembra,



Foto 1. Equipo de siembra directa trabajando. Foto 2 (dcha.). Monitor X20 en operación de guiado-siembra (Topcon).



consiguiendo limitar el esfuerzo de tiro (limitando el consumo) y aumentar la velocidad de operación (capacidad de trabajo, ha/h). Por otra parte, los sistemas de control activo permiten mejorar la uniformidad en la profundidad de siembra adaptándose al perfil de terreno y solventando las diferencias en residuo vegetal a lo largo de la parcela.

La **figura 1** resume la relación existente entre la potencia del motor, la relación de transmisión de la caja de cambios y la profundidad de trabajo del implemento. Cuando se emplea control activo, dado que son tres los parámetros de control (potencia, relación de cambio y profundidad) resulta imperativo el empleo de sistemas de control jerárquico de manera que sea posible la coordinación de los distintos subsistemas, que en ocasiones compiten de forma antagónica (menor consumo vs mayor profundidad).

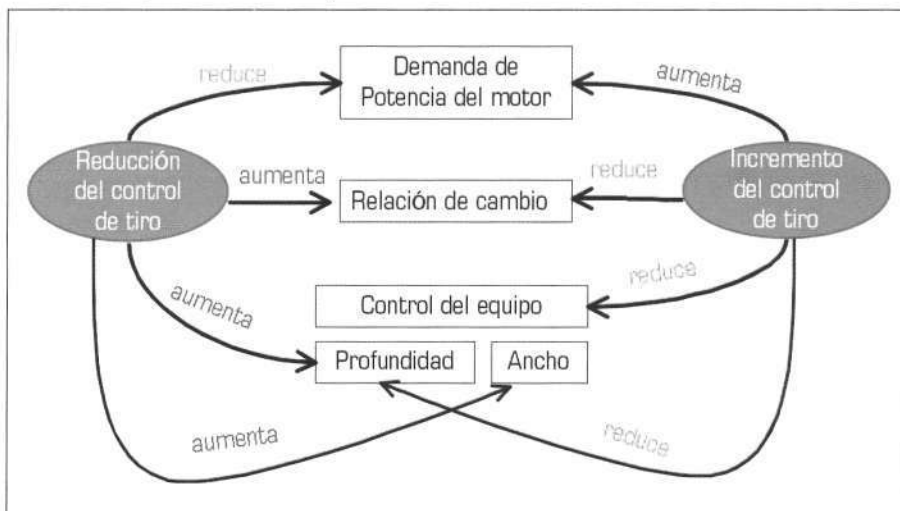
La **figura 2** representa tres ejes para la evaluación de la operación de siembra: el requerimiento de potencia, la correcta y uniforme consecución de la profundidad (calidad de la labor) y la capacidad de trabajo. En la actualidad (izquierda de la figura) las máquinas de siembra directa tienen a asegurar la calidad de la labor dotando al apero de un elevado peso, con lo que aumenta la potencia requerida. Los sistemas de control activo (derecha) tenderán a limitar los requerimientos de potencia, ajustando los esfuerzos para alcanzar de forma uniforme la profundidad, maximizando la capacidad de trabajo en términos de velocidad de avance, siempre que su velocidad de respuesta sea suficientemente elevada.

Los primeros sensores propuestos en la literatura para determinar la profundidad de trabajo instantánea fueron del tipo de ultrasonidos (**figura 3**). En la actualidad, es posible además incluir una batería de sensores tales como bulones de carga, células de carga en los resortes de control de profundidad y LVDTs o transductores inductivos para establecer el desplazamiento angular o vertical del cuerpo de siembra, algunos de ellos comercializados en sistemas de control comerciales (por ejemplo Topcon X20, **foto 2**). Por otra parte, puede resultar del máximo interés emplear células fotoeléctricas para el conteo y cuantificación del flujo de semillas. Existen ya en la actualidad sembradoras monograno con sensores ópticos de este tipo, pero son únicamente empleados por ahora para controlar los posibles fallos del dosificador (alveolos vacíos, **figura 4**). Toda esta información combi-

## FIGURA 1

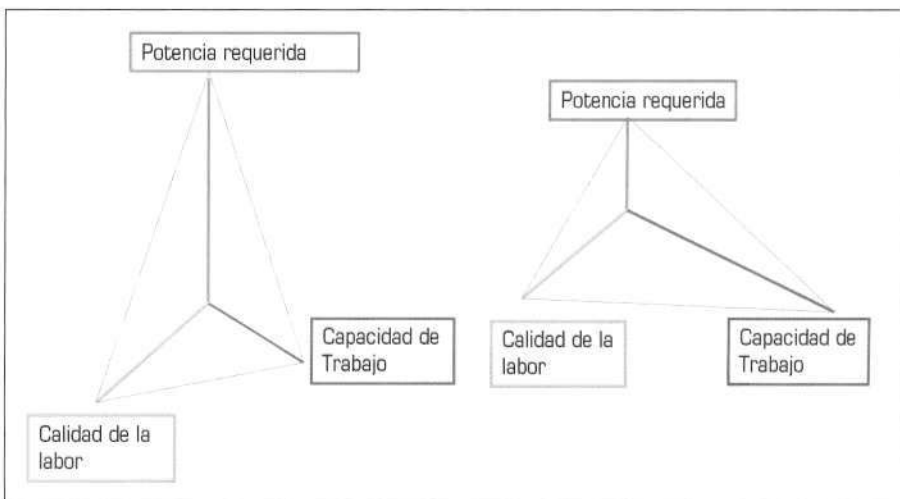
Resumen del efecto del control de tiro en distintos parámetros de funcionamiento del conjunto tractor-sembradora de siembra directa.

Fuente: Adaptado de Scarlett, 2001.



## FIGURA 2

Los tres ejes de interés en el control de aperos de labranza y por extensión al caso de siembra directa. Izquierda: situación en una siembra directa convencional. Derecha: con control activo de profundidad. Fuente Adaptado de Scarlett, 2001.



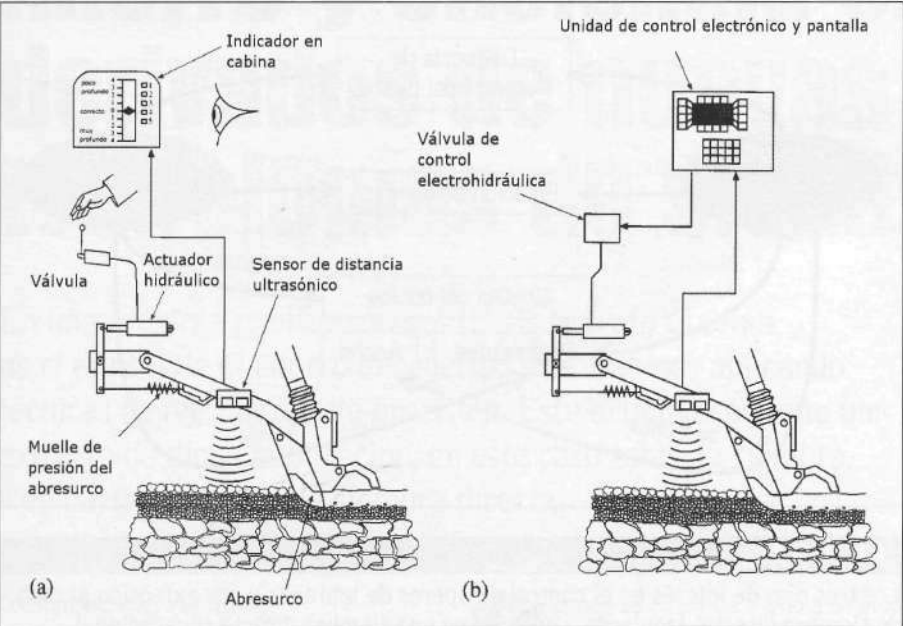
nada con los sistemas de georreferenciación permite establecer distintos mapas o capas de información a incluir en un SIG.

La calidad de la siembra se debe establecer en términos de la distribución horizontal y vertical de semillas y del porcentaje de nascencia. Existen muy pocos artículos que analicen de forma sistemática los efectos de los sistemas de control pasivo y activo respecto a estos parámetros. Los artículos más interesantes a este respecto son del año 2008 y 2009. El primero, re-

alizado por dos investigadores de la Universidad de Akdeniz en Turquía, aborda el efecto del control pasivo con tres procedimientos distintos de control de profundidad: rueda delantera, rueda trasera y lateral y dos procedimientos de apertura de disco: reja y doble disco. De acuerdo con este estudio, la variabilidad de la profundidad de siembra se vio especialmente acentuada en el caso de apertura de surco con doble disco. La menor variabilidad en la profundidad de siembra en los cultivos ensayados (maíz y sandía) se ob-

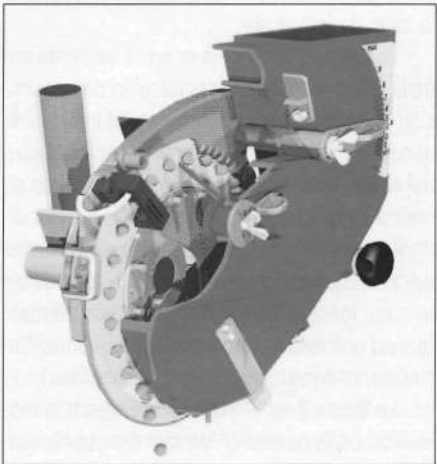
**FIGURA 3**

Es frecuente ver implementados sensores de ultrasonidos en sembradoras para controlar la profundidad del cuerpo de siembra. Fuente: Scarlett, 2001, reproducido de Auerhammer 1989.



**FIGURA 4**

Ciertas sembradoras monograno ya incorporan un sensor óptico (pieza negra rectangular) para el conteo de semillas durante la siembra (Doc Kverneland Accord).



**CUADRO I.**

Resultados en nascencia en un ensayo de tres procedimientos de control pasivo de profundidad de siembra.

Componente del control de profundidad empleado	Porcentaje de emergencia. Coeficiente de variación en profundidad de siembra (%)							
	MAÍZ				SANDÍA			
	Campo 1		Campo 2		Campo 1		Campo 2	
	Reja	Doble disco	Reja	Doble disco	Reja	Doble disco	Reja	Doble disco
Rueda trasera	86,7	84,3	90,3	89,7	74,3b	74,4b	79,0b	78,6b
	6,0a	7,8a	7,5a	11,8a	11,9a	13,1a	10,3a	10,9a
Rueda delantera	86,9	85,1	90,5	89,2	74,1b	75,0b	78,8b	78,7b
	5,9a	7,8a	7,4a	11,5a	11,3a	12,8a	9,9a	10,4a
Rueda lateral	87,3	85,4	91,0	89,0	76,7a	77,7a	86,7a	80,1a
	5,9b	6,6b	6,3b	10,2b	9,8b	10,9b	7,1b	8,6b

El empleo de sensores en tiempo real puede permitir la realización de estudios sistemáticos sobre la calidad de la siembra directa realizada. Letras iguales junto a los números indica que no hay diferencias, letras distintas indican diferencias significativas. Fuente: Karayel y Ozmerzi, 2008. Universidad de Akediz, Turquía.

**CUADRO II.**

Porcentaje de nascencia en distintos ensayos con control activo de profundidad: siembra convencional vs siembra directa y suelo escasamente compactado vs suelo muy compacto.

Número de plantas emergidas	Laboreo convencional (suelo normal)		No laboreo (suelo medio)		No laboreo (suelo duro)	
	Sin control de profundidad	Con control activo	Sin control de profundidad	Con control activo	Sin control de profundidad	Con control activo
Media	87	97	77	99	82	102

Una nascencia del 102% sólo puede ser atribuida al procedimiento de cómputo basada en el número de plantas esperado para una distancia teórica de siembra. Fuente: Burce, Kataoka et al. 2009.

tuvo en todos los casos con el sistema de control lateral que asimismo fue el que más se aproximó en valor medio a la profundidad de consigna. El **cuadro I**, elaborado a partir de los datos de Karayael y Ozmerzi resume los resultados en nascencia, así como en variabilidad de la distribución superficial y en profundidad de la semilla (**figura 5**, derecha). Este estudio indica además que los sistemas de control de profundidad con ruedas laterales son los menos sensibles a variaciones en los residuos vegetales del suelo aunque es necesaria mayor presión vertical para conseguir la correcta penetración del implemento.

En 2009 se han publicado dos trabajos relativos al control de profundidad en sembradoras de siembra directa. El primero (Canacki, Karayel et al., 2009) llevado a cabo por el mismo equipo de investigación que en el artículo anterior, compara la calidad del trabajo de siembra directa en maíz, algodón y soja para distintas condiciones de humedad (3,5% vs 18,7%) y de rastrojo en el suelo (1.320 kg/ha vs 2.230 kg/ha), y empleando en ambos casos elementos de apertura del surco de doble disco. En este estudio se menciona la ventaja comparativa que supone poder efectuar la siembra directa en condiciones de elevada sequedad del suelo aunque se reconoce que pueden producirse situaciones críticas que limiten la nascencia. Algunos de los resultados más relevantes indican

que en condiciones de mayor humedad las semillas tardaron más en nacer, en gran medida debido a que la profundidad de siembra se vio incrementada a pesar de establecer la misma regulación de la sembradora que para condiciones de suelo seco. Por otra parte la cantidad de residuo no afectó significativamente al nivel de nascencia. Parece claro que cualquier sistema agricultura de precisión para la supervisión en tiempo real de la uniformidad de la siembra constituirá una herramienta de gran valor que podrá emplearse como sistema simplemente de diagnóstico con control manual de la profundidad, o con un sistema de control activo (figura 3).

El control activo de la profundidad en equipos de siembra directa ha sido abordado muy recientemente en un trabajo de 2009 (Burce, Kataoka et al., 2009). Este estudio presentado en la reunión anual de ASABE ha sido llevado a cabo por varios investigadores de la Facultad de Agronomía de Hokkaido.

En este estudio se compara la siembra convencional y la siembra directa empleando un dispositivo hidráulico que permite efectuar un control activo de la profundidad de siembra (figura 6). A la vista de los resultados de este estudio (cuadro II) el control activo resulta muy efectivo tanto en siembra convencional como siembra directa, aunque la mejoría se duplica en siembra directa respecto a siembra convencional. Por tanto, el uso de sembradoras equipadas con estos sistemas supone no sólo un ahorro de combustible, sino también una mejor nascencia.

En la medida en que el número de sensores y de actuadores se incrementa, resulta imprescindible emplear un diseño eficiente de la configuración electrónica. En este sentido existen en el mercado sistemas de control adaptados a sembradoras con o sin comunicación Isobus (foto 3).

## Trabajos en desarrollo

A día de hoy, la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid y la Escola Superior Agrária de Elvas del Instituto Politécnico de Portalegre se encuentran trabajando de manera conjunta en tareas de siembra directa de maíz mediante el empleo de técnicas de agricultura de precisión. Para ello se estudia el desarrollo de un sistema activo que permita el posicionamiento de las semillas siempre a una misma profundidad, adaptándose así el sistema de siembra a las características del suelo sobre el que se encuentra trabajando.

La sembradora mecánica empleada durante los ensayos y en la cual fueron instalados los sensores, era una Semeato SSE 5/6 compuesta por cuatro cuerpos de siembra. En dicha sembradora y sobre uno de los brazos de siembra se instalaron un grupo de sensores:

- Una célula de carga posicionada en el resorte del brazo de siembra, que permitiera conocer la fuerza ejercida por el resorte sobre el brazo de siembra para que este penetrase en el suelo.
- Un LVDTs posicionado en el eje de la rue-

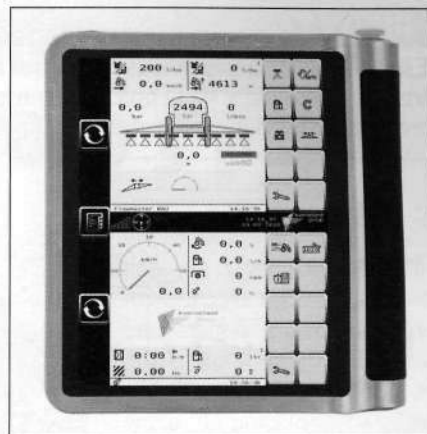


Foto 3. Terminal virtual ISOBUS de última generación, que incluye doble pantalla para poder mostrar los controles de dos implementos a la vez (sembradora y tractor, p.ej.) (Doc. Kverneland).

da de suspensión de la sembradora, cuantificando la distancia existente entre este eje y el brazo de siembra.

- Sensor magnético angular montado sobre una platina para el cálculo de movimiento angular entre el cuerpo de siembra y el brazo de compactación.

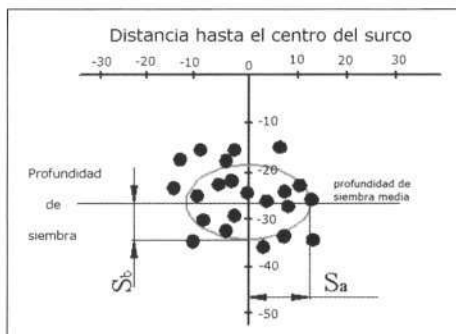
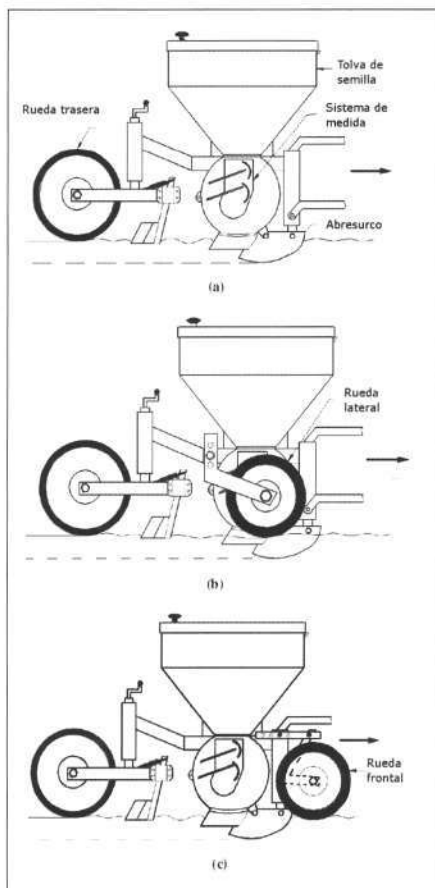
- Fotocélula instalada dentro del tubo de siembra, con la finalidad de poder cuantificar el flujo de semillas.

- Dos GPS instalados sobre la cabina del tractor y en el cuerpo de siembra sensorizado, que permitirán la georeferenciación posterior de los datos y el conocimiento de la relación entre los valores obtenidos por los sensores y la profundidad de siembra alcanzada en dicho lugar.



## FIGURA 5

Esquema de los tres sistemas de control activo estudiados (rueda trasera, lateral y frontal) y resultados de la precisión conseguida (desviación lateral y en profundidad, respecto al centro de la línea).



Fuente: Karayel y Ozmerzi, 2008. Universidad de Akiadiz, Turquía.

Una vez realizado el estudio de relación entre el comportamiento de los sensores instalados en el cuerpo de siembra; profundidades obtenidas por las semillas de manera manual y georreferenciada (foto 4); y porcentaje de germinación de éstas, se pretenderá llevar a cabo el desarrollo de un sistema activo que permitiera el posicionamiento de las semillas a una profundidad constante durante la siembra.

De esta manera se podría conseguir que el equipo de siembra trabaje siempre acorde con las características del suelo sobre las que se encuentra operando, realizándose así unas tareas de siembra con una mejor calidad de la labor.



Foto 4 Comprobación de la profundidad de siembra real establecida por la sembradora (UPM-ESAElvas).

## Conclusiones

La siembra es una operación costosa en términos de insumos, estando su éxito supeditado a un correcto y uniforme control de la profundidad de siembra y de la colocación espacial de las semillas.

La siembra directa es una técnica especialmente sensible a la correcta regulación y a las variaciones espaciales en compactación, humedad y residuo vegetal sobre el terreno.

La agricultura de precisión proporciona técnicas de diagnóstico de la calidad de siembra en tiempo real en los sistemas de control pasivo.

La incorporación de sistemas de control activo de profundidad puede mejorar enormemente la nascencia del cultivo a la vez que limita la fuerza de tracción requerida.

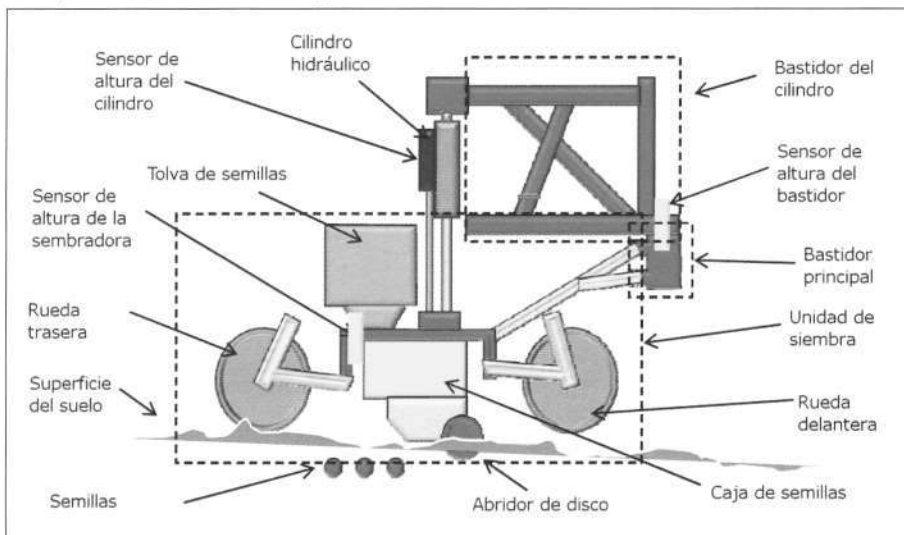
Conviene destacar en este artículo que, en la medida que los sistemas de control activo se impongan en la siembra directa, resultará imprescindible implementar sistemas de control de fallos de los sensores y de los actuadores. De no ser así, estas nuevas máquinas dotadas de electrónica compleja podrían ser poco fiables en condiciones de campo.

## Agradecimientos:

Los autores desean agradecer al IDAE (Instituto para la Diversificación y el Ahorro Energético) su apoyo para la realización de esta publicación.

## FIGURA 6

Equipo empleado para siembra directa con control activo de profundidad en ensayos de remolacha (Burge, Kataoka *et al.* 2009).



## Bibliografía ▼

- Canakci M., Karayel D., Topakci M., Koc A. 2009. Performance of a No-Till Seeder Under Dry and Wet Soil Conditions. *Applied Engineering in Agriculture* 25:459-465.
- Karayel D., Azmerzi A. 2008. Evaluation of Three Depth-Control Components on Seed Placement Accuracy and Emergence for a Precision Planter. *Applied Engineering in Agriculture* 24:271-276.
- Marlowe Edgar Cortes B., Takashi K., Hiroshi O., Yoichi S. 2009. Active Seed Depth Control for No-tillage Systems. 2009 Reno, Nevada, June 21 - June 24, 2009.
- Scarlett A.J. 2001. Integrated control of agricultural tractors and implements: a review of potential opportunities relating to cultivation and crop establishment machinery. *Computers and Electronics in Agriculture* 30 (2001) 167-191.